

発明の名称

光増幅モジュール、光増幅器及び光通信システム

発明の背景発明の分野

5 この発明は、信号光を増幅する光増幅モジュール、光増幅器、及び該光増幅器  
を含む光通信システムに関するものである。

関連する背景技術

波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光通信システム  
は、所定の信号波長帯域に含まれる複数チャネルが多重化された信号光（多重化  
信号光）を伝送するシステムであり、大容量情報の高速送受信を可能にする。ま  
た、WDM光通信システムでは、送受信可能な情報量の更なる大容量化を図るべ  
く、Cバンド（1530 nm～1565 nm）に含まれる多重化信号光だけでなく、Lバンド  
（1565 nm～1625 nm）に含まれる多重化信号光をも用い  
ることが検討されている。

15 これに対応し、光通信システムに適用される光増幅器は、Cバンドの信号光増  
幅のみならず、Lバンドの信号光増幅もその実現が要求されている。このような  
光増幅器としては、光増幅媒体として、光導波領域にEr元素が添加された石英  
系ホストガラスからなる光ファイバ（EDF: Erbium Doped Fiber）が適用され  
た光増幅器（EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier）が知られている。この  
光増幅器では、Er元素を励起し得る波長（1.48 μm又は0.98 μm）の  
励起光がEDFに供給され、このEDFにおいてCバンド又はLバンドの信号光  
が増幅される。

25 例えば、A. Mori, et al., ECOC1997, Tech. Dig., p.135（文献1）に記載さ  
れた光増幅器では、Alが共添加された石英系EDFが光増幅媒体として適用さ  
れており、平坦な利得が1600 nm付近の長波長側まで得られる。しかしながら、  
この光増幅器において、Lバンドの多重化信号光を一括増幅するには、利得

が平坦な波長帯域幅が狭い。また、上記文献1には、更に長波長側まで平坦な利得を得るべく、光増幅媒体としてテルライト系ホストガラスからなるEDFが適用された光増幅器が提案されている。しかしながら、テルライトガラスは熱損傷の危険があることから、この光増幅器は実用的では無い。

5 また、A. J. G. Ellison, et al., OFC2001, TuA2 (文献2) に記載された光増幅器では、光増幅媒体として、Sb元素を含む多成分の石英系EDFが適用されている。しかしながら、Sb元素は有毒であることから、この光増幅器は実用的では無い。

さらには、熱損傷や毒性の問題が無いという点で、光増幅媒体として実用的な石英系EDFが適用された光増幅器も提案されている。例えば、I. P. Byriel, et al., ECOC2001, Tu. L. 3.5 (文献3) に記載された石英系EDFの組成は不明であるが、角井他、電子情報通信学会総合大会、C-3-28、2002 (文献4) や S. Tanaka, et al., OFC2002, Tech. Dig., ThJ3 (文献5) に記載された石英系EDFはP元素及びAl元素が共添加されている。これらの文献3～5に記載されたEDFでは、利得が1620nm付近の長波長側まで得られている。しかしながら、波長1580nm付近で利得が顕著に小さく、WDM伝送において重要な利得平坦度が損なわれている。

ここで、EDFの利得スペクトルの利得平坦度は、図1で説明される相対利得偏差により評価され得る。図1は、EDFの相対利得偏差を説明するための典型的な利得スペクトルある。この図1に示されたように、EDFの利得スペクトルは、利得を有する波長帯域内において大略的に見れば2つの利得極大値と1つの利得極小値とを有する。利得極小値を $G_{min}$ (dB)とし、利得最大値 $G_{max}$ (dB)と利得極小値 $G_{min}$ との差を $\Delta G$ とする。そして、差 $\Delta G$ と利得極小値 $G_{min}$ との比( $\Delta G / G_{min}$ )で相対利得偏差を表す。また、利得極小値 $G_{min}$ 以上の利得が得られている波長帯域を実効的信号波長域と呼ぶ。

以上のように定義された相対利得偏差により利得平坦度を評価すると、文献3

に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度であり、文献4に記載されたEDFの相対利得偏差は30%を超え、文献5に記載されたEDFの相対利得偏差は25%程度である。EDFの相対利得偏差が大きすぎると、利得を等化するために挿入される光フィルタの挿入損失は大きくならざるを得ず、励起効率の劣化や雑音指数の劣化を惹起する。

例えば、陸上幹線系で一般に要求される光増幅器の利得は30dB程度である。この光増幅器に適用されるEDFの相対利得偏差を25%とする。陸上幹線系において、光増幅器はEDFに加えて分散補償光ファイバをも内蔵するのが一般的であり、この分散補償光ファイバの損失は典型的には10dB程度である。また、光増幅器には、その他の受動光部品（例えば、光カプラ、光アイソレータ、等）が挿入され、これら受動光部品の挿入損失の合計は6dB程度である。このとき、EDFが実現すべき利得は46dB（=30dB+10dB+6dB）にも達する。また、EDFの相対利得偏差が25%であることから、利得を等化するために挿入される光フィルタのピーク挿入損失は、11.5dB（=46dB×0.25）にもなり、分散補償光ファイバの損失に匹敵するほどの大きさとなる。このことは、励起効率や雑音指数に大きな悪影響を与えることになる。

ところで、既に普及しているCバンド用光増幅器において、EDFの相対利得偏差は、その石英系EDFに共添加される元素の種類や濃度に依存するが、13～19%程度である。図2は、A1共添加石英系EDFの利得スペクトルである。なお、この図2において、グラフG2010はA1共添加濃度が1重量%のときの利得スペクトル、グラフG2020はA1共添加濃度が2.5重量%のときの利得スペクトル、グラフG2030はA1共添加濃度が3.5重量%のときの利得スペクトル、及び、グラフG2040はA1共添加濃度が5重量%以上のときの利得スペクトルが、それぞれ示されている。この図2から分かるように、A1共添加濃度が大きいほど、EDFの相対利得偏差が小さく、EDFの相対利得偏差は13～19%程度である。そこで、Lバンド用光増幅器でも、EDFの相対

利得偏差は、この程度の値が目標値となる。

### 発明の概要

発明者らは、従来の光増幅器について検討した結果、以下のような課題を発見した。すなわち、文献1に記載された光増幅器は、光増幅媒体として熱損傷の危険があるテルライト系ホストガラスからなるEDFが適用されており、実用的では無い。文献2に記載された光増幅器は、光増幅媒体として毒性を有するSb元素を含む多成分の石英系EDFが適用されており、やはり実用的では無い。また、文献3～5それぞれに記載された光増幅器は、光増幅媒体として熱損傷や毒性の問題が無いという点で実用的な石英系EDFが適用されているが、EDFの相対利得偏差が大きく、励起効率や雑音指数に大きな悪影響を与える懸念がある。

この発明は、上述のような課題を解決するためになされたものであり、Lバンドにおいて相対利得偏差の小さい広帯域利得スペクトルを実現する実用的な光増幅モジュール、該光増幅モジュールを含む光増幅器、さらには、該光増幅器を含み、大容量情報の送受信を可能にする光通信システムを提供することも目的としている。

この発明に係る光増幅モジュールは、波長1610nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光（多重化信号光）を一括増幅すべく、酸化Bi系ホストガラスからなるBi系光導波路と、励起光供給システムを備える。上記Bi系光導波路は、上記信号光が伝搬する領域であってEr元素が添加された光導波領域を有する。また、上記励起光供給システムは、Bi系光導波路の光導波路領域内に反転分布を生じさせるべく、所定波長の励起光を該Bi系光導波路に供給する。また、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造を備えた光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）を含み、Lバンドに含まれる多重化信号光を該光増幅モジュールにより増幅する。さらに、この発明に係る光通信システムは、上述のような構造を有する光増幅器（この発明に係る光増幅器）を含み、Lバンドに含まれる多重化信号光を伝送するとともに、

この多重化信号光を該光増幅器により一括増幅する。

この発明に係る光増幅モジュールでは、励起光が供給されることにより E<sub>r</sub> 添加 B<sub>i</sub> 系光導波路の光導波領域内に反転分布が生じ、該光導波領域内を伝搬する多重化信号光（波長 1610 nm 以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化されている）が増幅される。また、このような光増幅モジュールを含む光増幅器では、L バンドに含まれる多重化信号光が増幅される。さらに該光増幅器を含む光通信システムでは、L バンドに含まれる多重化信号光が伝送されるとともに、光増幅器により増幅される。このように当該発明によれば、光増幅媒体として E<sub>r</sub> 添加 B<sub>i</sub> 系光導波路が適用されているので、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、L バンドに含まれる広帯域の実効的信号波長域に亘って相対利得偏差を小さくすることができる。

なお、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、E<sub>r</sub> 元素が添加された上記 B<sub>i</sub> 系光導波路の光導波領域には、B 元素がさらに添加されてもよい。長波長側の蛍光特性が改善され、ガラスファイバを利用した光ファイバネットワークの構築が容易になるからである。

この発明に係る光増幅モジュールは、励起光供給システムから B<sub>i</sub> 系光導波路に供給される励起光の光パワーを調節する制御部を備えるのが好ましい。この制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度において、あるいはいずれかの動作温度において、B<sub>i</sub> 系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が 20 25 % 未満、さらには 19 % 未満になるよう上記励起光の光パワーを調節する。

上記制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において、B<sub>i</sub> 系光導波路の正味利得スペクトルの相対利得偏差が 25 % 未満となる波長帯域幅が 37 nm を越えるよう、さらには 50 nm を越えるよう上記励起光の光パワーを調節してもよい。また、上記制御部は、当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において、B<sub>i</sub> 系光導波路の正味利得スペクトルの相対利得偏差が 19 % 未満となる波長帯域幅が 37 nm を越えるよう、さらには 50 nm を越えるよう上記励

起光の光パワーを調節してもよい。

この発明に係る光増幅モジュールは、利得平坦度のフィードバック制御のため、B<sub>i</sub>系光導波路又はその近傍の温度を検出する温度検出素子をさらに備えてもよく、また、該B<sub>i</sub>系光導波路又はその近傍の温度を調整する温度調整素子をさらに備えるのが好ましい。この場合、利得の温度依存性が大きいB<sub>i</sub>系光導波路又はその近傍の温度は、温度検出素子により検出され、あるいは、温度調整素子により調整される。

なお、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造の光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）と制御部を備える。

特に、上記制御部は、当該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量ΔG（dB）に基づいて、該光増幅モジュールのB<sub>i</sub>系光導波路又はその近傍の温度をΔT（K）だけ変化させる。これによりスパンロスなどの変動に起因した動作利得の変動が余儀なくされたとしても、余分な光部品なしに利得平坦度の維持が可能になる。なお、利得変動の検出のため、この発明に係る光増幅器は、当該光増幅器における入力及び出力の少なくともいずれかをモニタリングすることにより、動作利得を検出するパワーモニタをさらに備えてもよい。また、利得変動の検出のため、この発明に係る光増幅器は、当該光増幅器における入力及び出力の少なくともいずれかをモニタリングすることにより、利得傾斜を検出するオプティカルパフォーマンスマニタを備えてもよい。さらに、このような構造の光増幅器を含む光通信システムでは、利得変動の検出のため、上位監視システムとを備えてもよい。

上記制御部は、±1 dB程度の高精度で利得平坦度を維持すべく、例えば以下のような制御を行う。すなわち、当該制御部は、B<sub>i</sub>系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値をG<sub>min</sub>（dB）とするとき、以下の関係を満たすよう上記ΔT（K）を制御する。

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 - 1.2$$

$\leq \Delta G \leq$

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 + 1.2$$

また、上記制御部は、より高速な利得平坦制御を可能にすべく、当該光増幅器の実際の運用時における $\Delta G$  ( $dB$ ) と $\Delta T$  ( $K$ ) の実測データを、予め格納したメモリを備えるのが好ましい。

上記制御部は、利得平坦度のフィードバック制御のため、検出された利得傾斜に基づいて、上記B*i*系光導波路又はその近傍の温度を変化させてもよい。

具体的には、この発明に係る光増幅器は、上述のような構造を備えた光増幅モジュール（この発明に係る光増幅モジュール）と、例えば可変減衰器などの光損失部品と、制御部を備える。上記光損失部品は、信号光の伝送経路上に設けられ、該信号光に対する損失特性が可変である。また、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに該光増幅モジュールのB*i*系光導波路に対する加熱指示を行う一方、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに該光増幅モジュールのB*i*系光導波路に対する冷却指示を行う。

なお、信号チャネル間のレベル偏差に影響されずに利得傾斜を検出するため、当該光増幅器は、信号経路から分岐された信号光の一部を受光することにより、利得傾斜の検出を行うオプティカルパフォーマンスマニタをさらに備えてもよい。また、簡単な利得傾斜の検出方法としては、上記B*i*系光導波路内を伝搬する信号光に含まれるチャネルのうち少なくとも一チャネルの信号レベルをモニタすることにより、利得傾斜を検出することもできる。さらに、信号波長帯域における少なくともいずれかの波長におけるASEレベルをモニタすることにより、利得傾斜を検出してもよい。

上記光損失部品として可変光減衰器を有する光増幅モジュールを含む光増幅器において、制御部は、検出された光増幅モジュールのB*i*系光導波路又はその近傍の温度変化 $\Delta T$  ( $K$ )に基づいて、該光増幅モジュールの可変光減衰器における光減衰量 $\Delta A$  ( $dB$ )を決定してもよい。この場合、消費電力を節約しながら

利得平坦度の維持が可能になる。具体的には、上記制御部は、可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が検出された温度変化 $\Delta T$  (K) に比例するよう、該可変減衰器を制御する。

利得平坦度を±1 dBの高精度で維持するためには、上記制御部は、光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が以下の関係を満たすよう、上記温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御する。

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T + 1.2$$

さらに、上記制御部は、光増幅モジュールにおけるBi系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dB) とするとき、可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が以下の関係を満たすよう、該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、可変減衰器を制御してもよい。

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

なお、上記制御部は、低消費電力で高速制御（演算を行わない）を実現するため、光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)、温度変化 $\Delta T$  (K)、さらには可変光減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを、予め格納したメモリを備えるのが好ましい。

上述のような構成において、利得平坦度のフィードバック制御を可能にするため、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜に基づき、上

記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) を変化させてもよい。具体的には、上記制御部は、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の増加指示を行う一方、検出された光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の減少指示を行う。

この場合も、当該光増幅器は、信号チャネル間の偏差に影響されずに利得傾斜を検出するため、信号経路から分岐された信号光の一部を受光することにより、利得傾斜の検出を行うオプティカルパフォーマンスマニタをさらに備えるのが好ましい。また、B<sub>i</sub>系光導波路内を伝搬する信号光に含まれるチャネルのうち少なくとも一チャネルの信号レベルをモニタすることにより、あるいは、信号波長帯域における少なくともいずれかの波長におけるASEレベルをモニタすることによっても利得傾斜を検出することができる。

なお、この発明に係る光増幅モジュールは、多重化信号光の伝送経路上に設けられ該多重化信号光に対する損失特性が可変である光損失部品を備えてもよく、具体的に光損失部品は、可変光減衰器を含むのが好ましい。この場合、B<sub>i</sub>系光導波路の正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となる。

この発明に係る光増幅モジュールは、B<sub>i</sub>系光導波路の背景損失 $\alpha_B$  (dB/m) とE<sub>r</sub>による吸収ピーク $\alpha$  (dB/m)との間に以下のような関係が成り立つのが好ましい。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha$$

さらに、以下のような関係が成り立つのが好ましい。

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha$$

前者の場合には、B<sub>i</sub>系光導波路の正味利得において相対利得偏差を25%以下とすることが可能となり、後者の場合には、B<sub>i</sub>系光導波路の正味利得において相対利得偏差を19%以下とすることが可能となる。

この発明に係る光増幅モジュールにおいて、B<sub>i</sub>系光導波路は光ファイバを含

むのが好ましい。この場合、導波路長を長くすることができ、利得を大きくすることができるからである。

また、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、励起光供給システムは、中心出力波長が最高出力時に  $1453\text{nm} \sim 1473\text{nm}$  の範囲にある光源を含むのが好ましい。さらに該励起光供給システムは、中心出力波長が常時  $1453\text{nm} \sim 1473\text{nm}$  の範囲にある光源を含むのが好ましい。B<sub>i</sub>系光導波路の励起効率に優れているからである。

より具体的には、この発明に係る光増幅モジュールにおいて、励起光供給システムは、半導体発光素子と、回折格子を備える。上記半導体発光素子は、光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有する。また、上記回折格子は、半導体発光素子の光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射し、該反射された光を光出射面から半導体発光素子の内部へ入射させるよう機能する。この回折格子としては、例えば光ファイバ内に形成された光ファイバグレーティングが適している。励起光供給システムから供給される励起光の波長を安定させることができるのである。

この発明に係る光増幅モジュールは、石英系ホストガラスからなる石英系光導波路をさらに備えるのが好ましい。なお、この石英系光導波路は、E<sub>r</sub>元素が添加された光導波領域を有する。この場合、励起効率又は雑音指数が改善される。石英系光導波路が、多重化信号光の進行方向から見てB<sub>i</sub>系光導波路の上流側に配置された場合、雑音指数が改善される。一方、石英系光導波路が、多重化信号光の進行方向から見てB<sub>i</sub>系光導波路の下流側に配置された場合には、励起効率が改善される。また、石英系光導波路は、A<sub>1</sub>元素及びL<sub>a</sub>元素の少なくとも一方とP元素とが共添加されるのが好ましく、この場合、レバンド利得帯域が拡張される。

この発明に係る光増幅器及び光通信システムは、多重化信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見てB<sub>i</sub>系光導波路の上流側に配置されたラマン

増幅用光ファイバをさらに備えてもよい。このとき、ラマン増幅用光ファイバには、波長  $1470\text{ nm}$ 付近の励起光及び波長  $1520\text{ nm}$ 以上の励起光の少なくとも一方が供給されることにより、分布型ラマン増幅器が実現される。

#### 図面の簡単な説明

5 図1は、EDFの相対利得偏差を説明するために用意された典型的な利得スペクトルである。

図2は、A1共添加石英系EDFの利得スペクトルである。

図3は、この発明に係る光通信システムにおける第1実施例の構成を示す図である。

10 図4は、この発明に係る光増幅器における第1実施例の構成を示す図である。

図5は、この発明に係る光増幅器における第2実施例の構成を示す図である。

図6は、Bi系EDFの利得スペクトルである。

図7A及び図7Bは、Bi系EDFの利得スペクトルである。

15 図8は、Bi系EDFの正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明するため用意された典型的な利得スペクトルである。

図9は、励起光波長と利得との関係を示すグラフである。

図10は、信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。

図11は、この発明に係る光増幅器における第3実施例の構成を示す図である。

20 図12は、この発明に係る光増幅器における第4実施例の構成を示す図である。

図13は、この発明に係る光増幅器における第5実施例の構成を示す図である。

図14は、信号光波長と規格化されたGDTとの関係を示すグラフである。

25 図15は、この発明に係る光増幅器における第6実施例の構成を示す図である。

図16は、利得傾斜制御を説明するための信号出力スペクトルである。

図17は、この発明に係る光増幅器における第7実施例の構成を示す図である

図18は、この発明に係る光増幅器における第8実施例の構成を示す図である

5

図19A及び図19Bは、この発明に係る光通信システムにおける第2実施例  
及び比較例の構成をそれぞれ示す図である。

図20A及び図20Bは、図19に示された光通信システムについて、信号光波長と利得の関係及び信号光波長と雑音指数の関係をそれぞれ示すグラフである

10

#### 好適な実施例の詳細説明

以下、この発明に係る光増幅モジュール等の各実施例を、図3～図6、図7A、図7B、図8～図18及び図19A～図20Bを用いて詳細に説明する。なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

15

図3は、この発明に係る光通信システムの第1実施例の構成を示す図である。

この図に示された光通信システム1は、光送信局10、光中継局20、光受信局30及び光ファイバ伝送路40、50を備えている。光ファイバ伝送路40は、光送信局10と光中継局20との間に敷設されており、光ファイバ伝送路50は、光中継局20と光受信局30との間に敷設されている。

20

光送信局10は、光源部 $11_{c_1} \sim 11_{c_4}$ 、光源部 $11_{L_1} \sim 11_{L_4}$ 、光合波器 $12_c$ 、光合波器 $12_L$ 、光増幅器 $13_c$ 、光増幅器 $13_L$ 及び光合波器 $14$ を備える。光源部 $11_{c_1} \sim 11_{c_4}$ それぞれは、Cバンドに含まれる互いに異なる波長の複数チャネルが多重化された信号光を出力する。光合波器 $12_c$ は、光源部 $11_{c_1} \sim 11_{c_4}$ それぞれから出力されたCバンドの各信号チャネルの光を入力し、これらを合波する。光増幅器 $13_c$ は、光合波器 $12_c$ で合波されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。光源部 $11_{L_1}$

25

～ $11_{L_4}$ それぞれは、Lバンドに含まれる互いに異なる複数チャネルが多重化された信号光を出力する。光合波器 $12_L$ は、光源部 $11_{L_1} \sim 11_{L_4}$ それぞれから出力されたLバンドの各信号チャネルの光を入力し、これらを合波する。光増幅器 $13_L$ は、光合波器 $12_L$ で合波されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。そして、光合波器 $14$ は、光増幅器 $13_c$ から出力されたCバンドの多重化信号光と、光増幅器 $13_L$ から出力されたCバンドの多重化信号光とを入力し、これらを合波する。光合波器 $14$ で合波された多重化信号光は、光ファイバ伝送路 $40$ へ送出される。

光中継局 $20$ は、光分波器 $21$ 、光合波器 $23$ 、光増幅器 $23_c$ 及び光増幅器 $23_L$ を備える。光分波器 $21$ は、光ファイバ伝送路 $40$ を介して到達した多重化信号光を入力し、その多重化信号光をCバンドとLバンドとに分波する。Cバンドに分波された多重化信号光は光増幅器 $23_c$ へ導かれる一方、Lバンドに分波された多重化信号光は光増幅器 $23_L$ へ出力される。光増幅器 $23_c$ は、光分波器 $21$ から出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。光増幅器 $23_L$ は、光分波器 $21$ から出力されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅する。そして、光合波器 $22$ は、光増幅器 $23_c$ から出力されたCバンドの多重化信号光と、光増幅器 $23_L$ から出力されたCバンドの多重化信号光とを入力し、これらを合波する。そして、このように合波された多重化信号非有りが光ファイバ伝送路 $50$ へ送出される。

光受信局 $30$ は、受光部 $31_{c_1} \sim 31_{c_4}$ 、受光部 $31_{L_1} \sim 31_{L_4}$ 、光分波器 $32_c$ 、光分波器 $32_L$ 、光増幅器 $33_c$ 、光増幅器 $33_L$ 及び光分波器 $34$ を備える。光分波器 $34$ は、光ファイバ伝送路 $50$ を介して到達した多重化信号光を入力し、その多重化信号光をCバンドとLバンドとに分波する一方、Cバンドの多重化信号光を光増幅器 $33_c$ へ出力し、Lバンドの多重化信号光を光増幅器 $33_L$ へ出力する。光増幅器 $33_c$ は、光分波器 $34$ から出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅して出力する。光分波器 $32$

cは、光増幅器33cから出力されたCバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光をチャネルごとに分波する。受光部31c<sub>1</sub>～31c<sub>4</sub>それぞれは、光分波器32cにより分波されて出力されたCバンドの各波長の信号光を受光して、これを電気信号に変換して出力する。光増幅器33Lは、光分波器34より出力されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光を一括増幅して出力する。光分波器32Lは、光増幅器33Lから出力されたLバンドの多重化信号光を入力し、この多重化信号光をチャネルごとに分波する。受光部31L<sub>1</sub>～31L<sub>4</sub>それぞれは、光分波器32Lにより分波されたLバンドに含まれる複数チャネルの信号光を受光して、これを電気信号に変換する。

10 この光通信システム1において、光源部11c<sub>1</sub>～11c<sub>4</sub>から出力されたCバンドの多重化信号光は、光送信局10内の光合波器12cにより合波され、光増幅器13cにより一括増幅された後、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40を伝搬したCバンドの多重化信号光は、光中継局20内の光分波器21を通過して光増幅器23cにより一括増幅された後、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50を伝搬してきたCバンドの多重化信号光は、光受信局30内の光分波器34を経て、光増幅器33cにより一括増幅された後、光分波器32cにより信号チャネルごとに分波され、受光部31c<sub>1</sub>～31c<sub>4</sub>に受信される。

一方、光源部11L<sub>1</sub>～11L<sub>4</sub>から出力されたLバンドの多重化信号光は、光送信局10内の光合波器12Lにより合波され、光増幅器13Lにより一括増幅された後、光合波器14を経て、光ファイバ伝送路40へ送出される。光ファイバ伝送路40を伝搬してきたLバンドの多重化信号光は、光中継局20内の光分波器21を経て、光増幅器23Lにより一括増幅された後、光合波器22を経て、光ファイバ伝送路50へ送出される。光ファイバ伝送路50を伝搬してきたLバンドの多重化信号光は、光受信器30内の光分波器34を経て、光増幅器33Lにより一括増幅された後、光分波器32Lにより信号チャネルごとに分波され

、受光部  $31_{L_1} \sim 31_{L_4}$  により受信される。

図4は、この発明に係る光増幅器における第1実施例の構成を示す図である。

この図に示された光増幅器100は、図3に示された光通信システム1に含まれる光増幅器137に適している。この光増幅器100は、入力端101から出力

5 端102へ向かって順に、光カプラ111、光アイソレータ121、光カプラ1  
13、Bi系EDF130、光カプラ114、光アイソレータ123及び光カプラ112を備える。また、この光増幅器100は、光カプラ111に接続された受光素子151、光カプラ112に接続された受光素子152、光カプラ113に接続された励起光源153、光カプラ114に接続された励起光源154、Bi  
10 系EDF130に接して又は近傍に設けられた温度検出素子161及び温度調整素子162、ならびに、当該光増幅器100全体の動作を制御する制御部190を備える。

光カプラ111は、入力端101を介して入力された多重化信号光の一部を分岐して受光素子151へ出力する一方、残りを光アイソレータ121へ出力する。

15 光カプラ112は、光アイソレータ122から到達した多重化信号光の一部を分岐して受光素子152へ出力する。受光素子151、152それぞれは、到達した多重化信号光を受光して、その光パワーに応じた値の電気信号を制御部190へ出力する。

20 光カプラ113は、光アイソレータ121から到達した多重化信号光をBi系EDF130へ出力するとともに、励起光源153から出力された励起光をもBi系EDF130へ出力する。光カプラ114は、Bi系EDF130から到達した多重化信号光を光アイソレータ122へ出力するとともに、励起光源154から出力された励起光をBi系EDF130へ出力する。これら光カプラ113、114及び励起光源153、154は、Bi系EDF130へ励起光を供給する励起光供給システムを構成する。

励起光源153、154それぞれは、Bi系EDF130に添加されたEr元

5

素を励起するための励起光を出力する光学デバイスであり、例えば、半導体レーザ光源が適している。また、励起光源153、154それぞれは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にあるのが好ましく、また、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にあるのがさらに好ましい。このような波長の励起光が利用されることにより、Bi系EDF130における信号増幅効率が向上する。

10

また、励起光源153、154それぞれは、光反射面と該光反射面に対向する光出射面とを有するレーザダイオードと、このレーザダイオードの光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して光出射面からレーザダイオードの内部へ入射させる回折格子とを含む。なお、この回折格子は光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングが適している。このように構成された励起光源153、154それれにより、出力波長が安定する。

15

光アイソレータ121、122それぞれは、入力端101から出力端102へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない光学デバイスである。

20

Bi系EDF130は、酸化Bi系ホストガラスからなり、その光導波領域にEr元素が添加されている光ファイバである。なお、このBi系EDF130は光ファイバではなく平面型光導波路であってもよいが、Lバンド用途では大きな吸収条長積( Unsaturated Absorption)が必要であるので、導波路長を確保し易い光ファイバが好ましい。このBi系EDF130の光導波領域内では、励起光源153、154から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、波長1610nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光が一括増幅される。

25

温度検出素子161は、Bi系EDF130に接して又は近傍に配置されており、Bi系EDF130又はその近傍の温度を検出する、例えばサーミスタなどが適している。温度調整素子162は、Bi系EDF130に接して又は近傍に

配置されており、Bi系EDF130又はその近傍の温度を調整する、例えばペルチエ素子やヒータが適している。

制御部190は、光増幅器100全体の動作を制御する。制御部190は、受光素子151、152それぞれから出力された電気信号を入力し、Bi系EDF130へ入力される信号光の光パワーを検知するとともに、Bi系EDF130から出力された信号光の光パワーを検知する。また、制御部190は、これら入力信号光パワー及び出力信号光パワーに基づいて、Bi系EDF130における增幅利得を求める。制御部190は、温度検出素子161により検出されたBi系EDF130又はその近傍の温度を得る。そして、制御部190は、これら検出情報に基づいて、励起光源153、154それぞれから出力される励起光の光パワーを制御し、温度調整素子162によるBi系EDF130又はその近傍の温度調整を制御する。

この光増幅器100の概略動作は以下のとおりである。励起光源153、154から出力された励起光源は、光カプラ113、114を経て、Bi系EDF130へ供給される。入力端101を介して入力されたLバンドの多重化信号光は、光カプラ111、光アイソレータ121及び光カプラ113を経てBi系EDF130に到達し、このBi系EDF130において一括光増幅される。Bi系EDF130において増幅された多重化信号光は、光カプラ114、光アイソレータ123及び光カプラ112を経て出力端102から出力される。

この光増幅器100に含まれるBi系EDF130における信号増幅動作は以下のように行われる。すなわち、当該光増幅器100の動作温度のうち何れかの動作温度において、Bi系EDF130における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、好ましくは19%未満となるよう、励起光供給システムからBi系EDF130に供給される励起光の光パワーが調整される。

当該光増幅器100の全動作温度範囲内において、Bi系EDF130における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、さらには19%未満となる

よう、励起光供給システムからB i 系 E D F 1 3 0 に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

当該光増幅器 1 0 0 の全動作温度範囲内において、B i 系 E D F 1 3 0 における正味利得スペクトルの相対利得偏差が 2 5 % 未満となる波長帯域幅が 3 7 n m を超えるか、さらには 5 0 n m を超えるよう、励起光供給システムからB i 系 E D F 1 3 0 に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

さらに、当該光増幅器 1 0 0 の全動作温度範囲内において、B i 系 E D F 1 3 0 における正味利得スペクトルの相対利得偏差が 1 9 % 未満となる波長帯域幅が 3 7 n m を超えるか、さらには 5 0 n m を超えるよう、励起光供給システムからB i 系 E D F 1 3 0 に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

図 5 は、この発明に係る光増幅器における第 2 実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器 2 0 0 は、図 3 に示された光通信システム 1 に含まれる光増幅器 2 3 L 、 3 3 L に適している。この光増幅器 2 0 0 は、入力端 2 0 1 から出力端 2 0 2 へ向かって順に、光カプラ 2 1 1 、光アイソレータ 2 2 1 、光カプラ 2 1 3 、 B i 系 E D F 2 3 1 、光アイソレータ 2 2 2 、分散補償光ファイバ 2 7 0 、光アイソレータ 2 2 3 、光カプラ 2 1 4 、 B i 系 E D F 2 3 2 、石英系 E D F 2 3 3 、光カプラ 2 1 5 、光アイソレータ 2 2 4 及び光カプラ 2 1 2 を備える。また、この光増幅器 2 0 0 は、光カプラ 2 1 1 に接続された受光素子 2 5 1 、光カプラ 2 1 2 に接続された受光素子 2 5 2 、光カプラ 2 1 3 に接続された励起光源 2 5 3 、光カプラ 2 1 4 に接続された励起光源 2 5 4 、光カプラ 2 1 5 に接続された励起光源 2 5 5 、 B i 系 E D F 2 3 1 に接して又は近傍に配置された温度検出素子 2 6 1 及び温度調整素子 2 6 4 、 B i 系 E D F 2 3 2 に接して又は近傍に配置された温度検出素子 2 6 2 及び温度調整素子 2 6 5 、石英系 E D F 2 3 3 に接して又は近傍に配置された温度検出素子 2 6 3 及び温度調整素子 2 6 6 、ならびに当該光増幅器 2 0 0 全体の動作を制御する制御部 2 9 0 を備える。

光カプラ 2 1 1 は、入力端 2 0 1 を介して入力された多重化信号光の一部を分

岐して受光素子 251 へ出力する一方、残りを光アイソレータ 221 へ出力する。光カプラ 212 は、光アイソレータ 224 から到達した多重化信号光の一部を分岐して受光素子 252 へ出力する。受光素子 251、252 それぞれは、到達した多重化信号光を受光して、その光パワーに応じた値の電気信号を制御部 290 へ出力する。

光カプラ 213 は、光アイソレータ 221 から到達した多重化信号光を Bi 系 EDF 231 へ出力するとともに、励起光源 253 から出力された励起光をも Bi 系 EDF 231 へ出力する。光カプラ 214 は、光アイソレータ 223 から到達した多重化信号光を Bi 系 EDF 232 へ出力するとともに、励起光源 254 から出力された励起光をも Bi 系 EDF 232 へ出力する。光カプラ 215 は、石英系 EDF 233 から到達した多重化信号光を光アイソレータ 224 へ出力するとともに、励起光源 255 から出力された励起光を石英系 EDF 233 へ出力する。光カプラ 213 及び励起光源 253 は、Bi 系 EDF 231 へ励起光を供給する励起光供給システムの一部を構成する。また、光カプラ 214、215 及び励起光源 254、255 も、Bi 系 EDF 232 及び石英系 EDF 233 へ励起光を供給する励起光供給システムの一部を構成する。

励起光源 253～255 それぞれは、Bi 系 EDF 231、232 又は石英系 EDF 233 に添加された Er 元素を励起するための励起光を出力する光学デバイスであり、例えば、半導体レーザ光源などが適している。また、励起光源 253、254 それぞれは、中心出力波長が最高出力時に 1453 nm～1473 nm の範囲にあるのが好ましく、また、中心出力波長が常時 1453 nm～1473 nm の範囲にあるのがさらに好ましい。このような波長の励起光が利用されることにより、Bi 系 EDF 231、232 における增幅効率が向上する。

また、励起光源 253～255 それぞれは、光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有するレーザダイオードと、このレーザダイオードの光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射して光出射面からレーザダイオードへ出射する。

ドの内部へ入射させる回折格子とを含む。この回折格子には、光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングが適している。このように構成される励起光源253～255それぞれにより、出力波長は安定する。

光アイソレータ221～224それぞれは、入力端201から出力端202へ向かう順方向に光を通過させるが、逆方向には光を通過させない。

B<sub>i</sub>系EDF231、232それぞれは、酸化B<sub>i</sub>系ホストガラスからなり、その光導波領域にE<sub>r</sub>元素が添加されている光ファイバである。このB<sub>i</sub>系EDF231、232の光導波領域内では、励起光源253、254から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、波長1610nm以上の波長域を含む信号波長帯域の複数チャネルが多重化された信号光を一括増幅される。

石英系EDF233は、石英系ホストガラスからなり、その光導波領域にE<sub>r</sub>元素が添加されている光ファイバである。この石英系EDF233の光導波領域内では、励起光源255から出力された励起光が供給されることにより反転分布が生じ、多重化信号光が一括増幅される。石英系EDF233は、図5に示されたように、多重化信号光の進行方向から見てB<sub>i</sub>系EDF233の下流側に配置されるのが好ましく、この場合、優れた励起効率が得られる。また、石英系EDF233は、B<sub>i</sub>系EDF232の上流側に配置されるのも好ましく、この場合には優れた雑音指数が得られる。また、石英系EDF233は、A1元素及びLa元素の少なくともいずれか一方とP元素とが共添加されているのがよい。

温度検出素子261は、B<sub>i</sub>系EDF231に接して又は近傍に配置されており、B<sub>i</sub>系EDF231又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子262は、B<sub>i</sub>系EDF232に接して又は近傍に配置されており、B<sub>i</sub>系EDF232又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子263は、石英系EDF233に接して又は近傍に配置されており、石英系EDF233又はその近傍の温度を検出する。温度検出素子261～263それぞれは、例えばサーミスタがなどが適している。

5

温度調整素子 264 は、 Bi 系 EDF 231 に接して又は近傍に配置されており、 Bi 系 EDF 231 又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子 265 は、 Bi 系 EDF 232 に接して又は近傍に配置されており、 Bi 系 EDF 232 又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子 266 は、 石英系 EDF 233 に接して又は近傍に配置されており、 石英系 EDF 233 又はその近傍の温度を調整する。温度調整素子 264～266 それぞれは、 例えペルチエ素子やヒータが適している。

10

分散補償光ファイバ 270 は、 信号光波長帯域において負の波長分散を有し、 光ファイバ伝送路 40 又は光ファイバ伝送路 50 における正の波長分散を補償する。

15

制御部 290 は、 光増幅器 200 全体の動作を制御する。制御部 290 は、 受光素子 251、252 それぞれから出力された電気信号を入力し、 Bi 系 EDF 231 へ入力された信号光の光パワーを検知するとともに、 石英系 EDF 233 から出力された信号光の光パワーを検知し、 また、 これら入力信号光パワー及び出力信号光パワーに基づいて Bi 系 EDF 231、232 及び石英系 EDF 233 における信号光增幅の利得を求める。また、 制御部 290 は、 温度検出素子 261 により検出された Bi 系 EDF 231 又はその近傍の温度、 温度検出素子 262 により検出された Bi 系 EDF 232 又はその近傍の温度、 及び、 温度検出素子 263 により検出された石英系 EDF 233 又はその近傍の温度を得る。そして、 制御部 290 は、 これら検出された情報に基づいて、 励起光源 253、254 それぞれから出力される励起光の光パワーを制御し、 温度調整素子 264 による Bi 系 EDF 231 又はその近傍の温度調整を制御し、 温度調整素子 265 による Bi 系 EDF 232 又はその近傍の温度調整を制御し、 温度調整素子 266 による石英系 EDF 233 又はその近傍の温度調整を制御する。

20

この光増幅器 200 の概略動作は以下のとおりである。励起光源 253～255 から出力された励起光源は、 光カプラ 213～215 を経て、 Bi 系 EDF 2

31、232及び石英系EDF233へ供給される。入力端201を介して入力されたLバンドの多重化信号光は、光カプラ211、光アイソレータ221及び光カプラ213を経て、Bi系EDF231に入力され、このBi系EDF231において一括増幅される。Bi系EDF231において増幅された多重化信号光は、光アイソレータ222を経て、分散補償光ファイバ270に入力され、この分散補償光ファイバ270により分散補償される。分散補償光ファイバ270により分散補償された多重化信号光は、光アイソレータ223及び光カプラ214を経て、Bi系EDF232及び石英系EDF233に順次に入力され、これらBi系EDF232及び石英系EDF233において一括増幅される。この光増幅された多重化信号光は、光カプラ215、光アイソレータ224及び光カプラ212を経て出力端202から出力される。

この光増幅器200に含まれるBi系EDF231、232における信号増幅動作は以下のように行われる。すなわち、当該光増幅器200の何れかの動作温度において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、さらには19%未満となるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整される。

また、当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満、さらには19%未満となるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が25%未満となる波長帯域幅が37nmを超えるか、さらには50nmを越えるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

さらに、当該光増幅器200の全動作温度範囲内において、Bi系EDF231、232における正味利得スペクトルの相対利得偏差が19%未満となる波長

帯域幅が37nmを超えるか、さらには50nmを越えるよう、励起光供給システムからBi系EDF231、232に供給される励起光の光パワーが調整されてもよい。

次に、光増幅器100、200に含まれるBi系EDF130、231、232についてさらに詳細に説明する。

図6は、Bi系EDFの利得スペクトルである。用意されたBi系EDFは、Er元素に起因した吸収条長積ピークが約300dBであり、長さが約2mであり、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であった。また、評価方法としては、増幅されるべき多重化信号光の替わりに、少数チャネルの主信号で模擬するポンプ・プロープ法が適用された。トータル入力信号光の光パワーは0dBmであり、1.48μm波長帯の励起光がBi系EDFへ双方向より供給された。

この図6には、Bi系EDFへ供給される励起光の光パワーを調整して得られた室温における4種類の反転分布1～4それぞれの場合について利得スペクトルが示されている。なお、グラフG410は反転分布1の利得スペクトル、グラフG420は反転分布2の利得スペクトル、グラフG430は反転分布3の利得スペクトル、そしてグラフG440は反転分布4の利得スペクトルである。この図6に示された4つの反転分布1～4のうち、反転分布3は、順方向励起光パワーが105mWであり、逆方向励起光パワーが32mWであるときに得られた。この反転分布3でLバンドにおいて最も良好な利得平坦度が得られた。

この反転分布3のときに、Bi系EDFの両端に接続された石英系光ファイバ間の正味利得において、相対利得偏差は14%であり、実効的信号波長域が1563nm～1615nmであり、実効的信号波長域の帯域幅が52nmであり、実効的信号波長域の利得極小値が11.8dBであった。このBi系EDFの相対利得偏差は、高濃度のAl元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差と同程度であった。このBi系EDFの実効的信号波長域の帯域幅は、高

濃度のA<sub>1</sub>元素が添加されたCバンド用石英系EDFの帯域幅(37nm)を大きく上回るものであった。また、このBi系EDFは、石英系光ファイバとの融着接続損失を含む背景損失が1.6dB程度であるので、Bi系EDF単体であれば相対利得偏差は更に1.6%程度改善される。

5 図7A及び7Bも、Bi系EDFの利得スペクトルである。ここでは、陸上幹線系の光通信システムで一般に要求される動作温度範囲内の0°C、25°C及び65それぞれにおいて2つの利得極大値が一致するように反転分布が調整された。  
 10 図7Bは、図7Aの縦軸を拡大したものであり、各温度において利得極小値を基準として利得偏差が縦軸に示されている。なお、これら図7A及び図7Bにおいて、グラフG510a、G510bは温度0°Cにおける利得スペクトル、グラフG520a、G520bは温度25°Cにおける利得スペクトル、グラフG530a、グラフG530bは温度65°Cにおける利得スペクトルである。

15 この図7A及び図7Bに示されたように、温度が高いほど利得は小さい。それゆえ、所望の利得平坦度を得るために必要なBi系EDFの吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。また、図7Bに示されたように、各温度の利得スペクトルの形状は実効的信号波長域1563nm～1615nmにおいて略一定であり、また、各温度で実効的信号波長域も略一定である。温度が高いほど利得極小値が小さく、その一方で、各温度で利得偏差が略一定であるので、温度が高いほど相対利得偏差は劣化する。しかしながら、温度65°Cにおいても相対利得偏差は15%(背景損失を除くと14%)であり、これは、A<sub>1</sub>元素が添加されたCバンド用石英系EDFの相対利得偏差より良好である。

20 25 図7Aから読み取れるように、室温時において吸収条長積ピークが275dBであるBi系EDFが適用された光増幅器は、実効的信号波長域内の利得極小値 $G_{min}$ (dB)と温度T(°C)との間に以下の関係(1)がある。

$$G_{min} = -0.049T + 14.6 \quad \cdots (1)$$

また、均一広がり近似から、吸収条長積と利得極小値  $G_{min}$  とは互いに比例関係にあるので、ある動作温度  $T$  (°C)において Bi 系EDFを用いて所望の利得  $G_x$  (dB)を得たい場合には、以下の式(2)で与えられる吸収条長積ピーク  $\alpha_T$  (dB)を有するBi系EDFを用いれば、上記の実効的信号波長域 1563 nm ~ 1615 nmにおいて平坦化された利得スペクトルが得られる。

$$\alpha_T = 6122G_x / (298 - T) \quad \cdots (2)$$

なお、厳密には、上述の利得  $G_x$  には Bi 系EDF自体の背景損失と融着接続損失とを加えるべきである。例えば、動作温度 25 °Cにおいて、Bi 系EDFの両端に接続された石英系光ファイバ間で 25 dB の正味利得を L バンドで得るには、背景損失と融着接続損失との合計値が 1 dB であるとすると、以下の式(3)のようにする必要がある。

$$G_x = 25 + 1 \quad \cdots (3)$$

この利得  $G_x$  の値と動作温度  $T$  の値 25 °C とを上記(2)式に代入すると、必要な吸収条長積ピーク  $\alpha_T$  は 580 dB 程度であることが分かる。

特に L バンドでの信号増幅において、一連長 (unitary) の Bi 系EDFが長すぎると励起光が Bi 系EDF全体に行き渡らない事態も生じ得るので、Bi 系EDFを多段構成とすることで、各段の Bi 系EDFに励起光を供給するのが好ましい。

また、上述のように、所望の利得平坦度を得るために必要な Bi 系EDFの吸収条長積ピークを求める際に、使用時の温度を規定することが重要である。すなわち、動作温度を規定せずに Bi 系EDFの利得平坦度を検討することは無意味である。そこで、図4及び図5に示された光増幅器 100、200 では、温度検出素子により各 Bi 系EDF又はその近傍の温度を検出し、温度調整素子により各 Bi 系EDF又はその近傍の温度を目標設定温度に調整している。この場合、温度調整素子（例えばペルチエ素子やヒータ）の消費電力を抑制するために、目標設定温度は、光増幅器が運用される典型的な動作温度範囲（陸上光通信システム

の場合には室温～40°C、海底光通信システムの場合には0°C～10°C程度)とするのが好ましい。

ただし、温度調整素子は一般に消費電力が大きく、また、周囲の環境に温度調整は大きく影響されるので、様々な使用環境を考慮すると高精度の温度制御は容易ではない。Bi系EDFの動作温度範囲が比較的広いと、利得平坦度の劣化につながる。そこで、以下に説明するような対処を行うのがよい。

図7Bから読み取れるように、実効的信号波長域内の利得極小値 $G_{min}$ (dB)の変化量 $\Delta G_{min}$ (dB)と温度変化 $\Delta T$ (°C)との間に、以下の関係(4)がある。

$$0.0036 \Delta T = \Delta G_{min} / G_{min}^* \quad \cdots (4)$$

ここで、 $G_{min}^*$ は、温度25°Cにおける利得極小値 $G_{min}$ である。上記の係数0.0036は、石英系EDFの場合の係数0.0026より大きい。この関係式を用いて以下のような対処法を採用する。

第1の対処法は、温度検出素子により各Bi系EDFの温度Tを検出し、温度変化 $\Delta T$ に基づいて光減衰量又は損失スペクトルを調整することで、温度変化 $\Delta T$ により生じた利得偏差を補償する。可変光減衰器が適用された場合、上記(3)式の関係を利用して、その可変光減衰器における光減衰量の変化量 $\Delta A$ と、Bi系EDFの温度変化量 $\Delta T$ との間に、実効的に以下のようないかん関係(5)が成立つとして、可変光減衰器における光減衰量の変化量 $\Delta A$ を求める。

$$\Delta A = -C_1 \Delta T \quad \cdots (5)$$

ここで、 $C_1$ は正の定数である。そして、可変光減衰器における光減衰量は、この変化量 $\Delta A$ だけ調整される。なお、このような計算式を用いるのではなく、光増幅器の運用開始前に、可変光減衰器における光減衰量とBi系EDFの温度Tとの間の関係を実測し、その関係を制御部190、290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

第2の対処法は、フィードバック制御又はフィードフォワード制御により温度

調整素子により各B<sub>i</sub>系EDFの温度を能動的に制御する。利得変化量  $\Delta G$  と B<sub>i</sub>系EDFの温度変化量  $\Delta T$ との間の関係は、上記(3)式の関係を利用して、以下の式(6)で与えられる。

$$\Delta G = -C_2 \Delta T \quad \dots (6)$$

5 ここで、  $C_2$  は正の定数である。そして、各B<sub>i</sub>系EDFの温度は、この変化量  $\Delta T$ だけ温度調整素子により調整される。なお、このような計算式を用いるのではなく、光増幅器の運用開始前に、利得GとB<sub>i</sub>系EDFの温度Tとの間の関係を実測し、その関係を制御部190、290内のメモリに記憶しておいて、これに基づいて制御を行ってもよい。

10 利得変化  $\Delta G$ は、光増幅器100の受光素子151、152又は光増幅器200の受光素子251、252による入力信号光パワー及び出力信号光パワーの検出に基づいて得られる。あるいは、利得変化  $\Delta G$ は、光通信システムの上位監視網から送られて来た所望の利得（多くの場合、敷設された光ファイバ伝送路の損失と一致）の情報に基づいて決定されてもよい。

15 なお、上記第1の対処法及び第2の対処法は、温度調整素子による各B<sub>i</sub>系EDFの温度を一定値に制御する方法と併用されてもよい。例えば、常時は温度調整素子による各B<sub>i</sub>系EDFの温度を一定値に制御する方法が採用され、温度制御素子が故障したときに第1の対処法が採用されるのが適している。このような対処方法により、光通信システム1の信頼性はさらに向上する。

20 また、これらの対処法を採用して利得極小値の変動を補償したとしても、図7Bから判るように、利得スペクトルの形状は温度によって僅かに異なっている。実効的信号波長域における利得偏差は、温度65°Cのときと比べて、温度0°Cのときには0.2dB～0.3dB程度大きい。図7A及び図7Bでは実効的信号波長域における利得極小値が10dB程度であるが、仮に実効的信号波長域における利得極小値が20dBであると、実効的信号波長域における利得偏差は、温度65°Cのときと温度0°Cのときとでは0.4dB～0.6dBもの差が生じて、

実用上無視し得ない。

このような事態に対処するには、光損失部品の損失スペクトルを、動作温度範囲の中心温度又は典型温度におけるB<sub>i</sub>系EDFの利得スペクトルと同一形状にするのが好ましい。この場合、温度変化により利得偏差が生じるが、これによる  
5 利得偏差は小さく抑えられる。

あるいは、温度変化により生じる利得偏差は実効的信号波長域において略定数倍に変化するので、このように調整が可能な損失スペクトルを有する光損失部品の利用が好ましい。このような光損失部品は、例えば、マッハツェンダ干渉計の構成を有していて、一方の光路上に動作温度範囲の下限値での利得スペクトルと  
10 同一形状の損失スペクトルを有する利得等化器が設けられ、他方の光路は単なるバイパスとなっていてもよい。

また、図5に示された光増幅器200の如くB<sub>i</sub>系EDF231、232に加えて石英系EDF233においても信号光を増幅する場合、上記の第1の対処法を採用する際には、B<sub>i</sub>系EDFと石英系EDFとでは、温度依存性が相違しているので、別個に温度検出素子を設けるのが好ましい。また、上記の第2の対象法を採用する際には、石英系EDFよりB<sub>i</sub>系EDFの方が僅かな温度変化でも利得を効率よく調整することができるので、石英系EDFよりB<sub>i</sub>系EDFの方が長いのが好ましい。

上記(3)式で説明したとおり、B<sub>i</sub>系EDFにおけるE<sub>r</sub>遷移に起因して利得スペクトルが平坦であっても、背景損失が大きければ、B<sub>i</sub>系EDFの正味利得の相対利得偏差は劣化する。図8は、B<sub>i</sub>系EDFの正味利得の相対利得偏差と背景損失との関係を説明する図である。この図に示されるように、B<sub>i</sub>系EDFの正味利得スペクトルG<sub>620</sub>は、E<sub>r</sub>遷移に起因した利得スペクトルG<sub>610</sub>から、背景損失及び融着損失の損失分ΔEを減じたものである。利得最大値と利得極小値との差ΔGが変化しないものの、B<sub>i</sub>系EDFの正味利得スペクトルの利得極小値G<sub>b</sub>は、E<sub>r</sub>遷移に起因して利得スペクトルの利得極小値G<sub>b</sub>より小  
20  
25

5

さい。このことから、背景損失が大きいほど、B<sub>i</sub>系EDFの正味利得の相対利得偏差は劣化する。図6、図7A及び図7Bに利得スペクトルが示されたB<sub>i</sub>系EDFは、特に背景損失が小さいことから、正味利得としても相対利得偏差は小さい。しかしながら、典型的にはB<sub>i</sub>系EDFの背景損失は2dB/m程度である。

10

以下では説明の簡便化のために室温化での動作について説明する。B<sub>i</sub>系EDFの背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) の許容値と、E<sub>r</sub>本来の吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m)との間には、以下の関係(7)が成り立つ。

$$(0.12 \times 0.042 \times \alpha) / (0.042 \times \alpha - \alpha_B)$$

≤ 正味利得の相対利得偏差 … (7)

15

ここで、定数値 0.12 は、図6に示された反転分布3の際の利得スペクトルから実測された背景損失が無いとした場合の相対利得偏差である。また、定数値 0.042 は、上記(2)式に温度Tとして陸上システムでの典型的動作温度40°Cを代入して得られる利得G<sub>x</sub>と吸収ピークとの比率である。相対利得偏差の目標値については、既述したとおり、19%を超えると、Cバンド用石英系EDFと同等のレベルダイアグラム設計ができなくなり、25%を超えると、P/A1共添加石英系EDFに対する優位性を失う。それ故、相対利得偏差の目標値は、25%以上であるのが好ましく、19%以上であるのがさらによい。

20

そこで、上記(7)式における右辺の正味利得の相対利得偏差を25%又は19%とすると、上記(7)式より、以下の式(8a)あるいは式(8b)なる関係が得られる。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha \quad \dots (8a)$$

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha \quad \dots (8b)$$

25

上述のように、典型的にはB<sub>i</sub>系EDFの背景損失  $\alpha_B$  は2dB/m程度であるので、E<sub>r</sub>本来の吸収ピーク  $\alpha$  は、95dB/m以上であるのが好ましく、143dB/m以上であるのがさらによい。なお、上記(8a)式及び(8b)式それぞ

れの右辺の係数は、想定される動作温度に応じて異なる場合があり得る。動作温度が低いと、これらの係数は大きくなる。

B<sub>i</sub>系EDFの蛍光特性は石英系EDFの蛍光特性と異なることが知られている。特に、B<sub>i</sub>系EDFの場合に波長1480nm付近に見られる蛍光特性の膨らみは、石英系EDFの場合には見られない特徴である。この特徴は、B<sub>i</sub>系EDF中のB元素の組成量が多いときに顕著である。また、蛍光特性と吸収特性との間には相関があるので、B<sub>i</sub>系EDFの場合には波長1480nm付近に吸収ピークがある筈である。

Cバンドの信号光を増幅する場合には、波長1.48μm帯の励起光の吸収効率が高いことは、励起効率の改善につながるので望ましい。しかしながら、Lバンドの信号光を増幅する場合には、使用する吸収条長積ピークが大きいので、励起光の吸収が信号光の利得と比較して大きすぎると、励起効率や雑音指数の劣化につながる。そこで、B<sub>i</sub>系EDFを用いてLバンドの信号光を増幅する場合には、励起光波長は1.48μmより短波長であるのが好ましい。

図9は、励起光波長と利得との関係を示すグラフである。このグラフは、図6、図7A及び図7Bで説明されたB<sub>i</sub>系EDFに対して双方向から出力50mWの励起光をそれぞれ供給することにより得られた。入力信号光のチャネル波長は1565nmであり、パワーは-35dBmであった。励起光のチャネル波長は、1450nm～1500nmの範囲で変化させた。この図から分かるように、励起光波長が1460nm付近であるときに、利得は大きい。最も望ましい励起光波長は1463nm程度である。

ただし、最も望ましい励起光波長より実際の励起光波長がずれていたとしても、挿入損失が小さい光部品を利用することにより、この波長ずれに起因した悪影響を回復することができる。図4に示されたように、光増幅器が1段のB<sub>i</sub>系EDFのみで構成された場合、典型的には、B<sub>i</sub>系EDFの入力側及び出力側それぞれに、モニタ用光カプラ、光アイソレータ、及び励起光供給用光カプラが挿入

5

される。これら個々の光部品につき、典型値より挿入損失を 0. 2 d B 程度まで低減することができる。したがって、励起光波長に対する許容範囲は、図 9 に示された利得ピーク波長を中心波長として、その利得ピークより 1. 2 d B 程度小さい利得となる波長範囲、すなわち、 $\pm 10 \text{ nm}$  程度の波長範囲となる。励起光波長の安定化のためには、レーザダイオードと共振グレーティングとの組合せからなる励起光源が適しており、また、共振グレーティングとして光ファイバに形成されたグレーティングを用いるのが安価である。

10

図 10 は、信号光波長と雑音指数との関係を示すグラフである。この図 10 において、グラフ G 810 は Bi 系 EDF の雑音指数、グラフ G 820 は P 共添加石英系 EDF の雑音指数、グラフ G 830 は P/A1 共添加石英系 EDF の雑音指数をそれぞれ示している。各 EDF へのトータル入力信号光の光パワーは 0 d Bm であった。Bi 系 EDF は、図 6、図 7A 及び図 7B で説明されたものであり、双方向より出力 60 mW の励起光が供給された。P/A1 共添加石英系 EDF は、双方向より出力 27 mW の励起光が供給された。P 共添加石英系 EDF は、順方向より出力 100 mW の励起光が供給された。

15

この図から分かるように、P/A1 共添加石英系 EDF と比較すると、Bi 系 EDF の雑音指数は、短波長側で劣っており、波長 1565 nm 付近では 1 d B 以上劣っている。これは、Bi 系 EDF の内部の背景損失や石英系光ファイバとの融着接続損失が高いことに起因する。さらに、濃度消光の影響も懸念される。このように、石英系 EDF と比較すると、Bi 系 EDF は、雑音指数や励起効率の点で劣っている。

20

このような事情を考慮すると、雑音指数を改善するには、石英系 EDF は、光増幅器の入力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直後に配置されるのが好ましい。また、励起効率を改善するには、石英系 EDF は、光増幅器の出力端付近や、分散補償光ファイバ等の大きな挿入損失を有する光部品の直前に配置されるのが好ましい。

ただし、一般に用いられているA<sub>1</sub>共添加石英系EDFは、波長1600nmより長波長側で利得が急激に低下するので、B<sub>i</sub>系EDFの特徴である広帯域に亘って平坦な利得スペクトル形状を損なうことになる。そこで、長波長側でも利得を有するP/A<sub>1</sub>共添加石英系EDFを用いるのがよい。

5 また、上述のように、P/A<sub>1</sub>共添加石英系EDFの相対利得偏差は大きく、この点でP/A<sub>1</sub>共添加石英系EDF単体では実用上問題がある。そこで、P/A<sub>1</sub>共添加石英系EDFとB<sub>i</sub>系EDFとを組み合わせて用いるのが好ましい。なお、石英系EDFの添加物としては、P元素に加えて、A<sub>1</sub>元素及びL<sub>a</sub>元素の少なくともいずれかが添加されるのが好ましい。仮に、A<sub>1</sub>元素及びL<sub>a</sub>元素のいずれも添加されていないと、図10に示されたように、100mW順方向励起の場合であっても、雑音指数が著しく劣化する。なお、A<sub>1</sub>元素とL<sub>a</sub>元素以外としては、3価の陽イオンとなる元素であれば、同様に機能すると思われる。

10 15 P/A<sub>1</sub>共添加石英系EDFの利得スペクトルと同等の利得スペクトルは、波長0.98μm帯の励起光への感度を向上させる働きを有するY<sub>b</sub>元素をさらに共添加することでも実現できる。Y<sub>b</sub>共添加は、特にクラッド励起などのように、大出力励起レーザを使用するときに適している。

以上のように、この発明に係る光増幅器100、200は、B<sub>i</sub>系EDFを光増幅媒体として用いることにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドに含まれる広帯域の実効的信号波長域で相対利得偏差を小さくすることができる。この光増幅器100、200を含む光通信システム1は、Lバンドを用いて大容量の情報を送受信することができる。この発明に係る光増幅器100、200は、特にB<sub>i</sub>系EDFの反転分布、温度及び吸収条長積ピーク(Unsaturated Absorption Peak)を最適化することにより、広帯域の実効的信号波長域で相対利得偏差を確実に小さくすることができる。この発明に係る光増幅器100、200は、励起光波長を最適化することにより、励起効率を高くすることができる。また、B<sub>i</sub>系EDFに加えてP/A<sub>1</sub>共添加石英系EDFをも

用いることにより、雑音指数が優れたものとなる。

なお、この発明は、上述の実施例に限定されるものではなく種々の変形が可能である。例えば、光ファイバ伝送路や分散補償光ファイバにおいて多重化信号光をラマン増幅してもよく、この場合には、雑音指数が更に改善され得る。

5 なお、図7A及び図7Bに示されたように、 $E_r$ 添加 $B_i$ 系EDFは、多重化信号光が伝搬する光導波領域で生じる反転分布を最適化して平坦化された利得の大きさが、利得スペクトル形状を維持した状態で高温になるほど小さくなるという傾向を有する（記式(4)参照）。この式(4)に示された関係を利用して以下のような制御方法を実現する光増幅器が得られる。

10 光通信システムでは、伝送用光ファイバ周辺の環境温度の変化などに起因して伝送路ロスが変動する、いわゆるスパンロス変動が懸念される。このとき、光増幅器は操作利得をスパンロスに合わせて変動させることが望ましい。

このための制御方法としては、例えば図11に示された第3実施例に係る光増幅器300のように、入出力モニタの比率から動作利得の変動を検出し、蒸気式15 (4)に基づいて $E_r$ 添加 $B_i$ 系EDFの温度を制御してもよい。多くの場合、光増幅器の出力は一定に保つ必要があり、出力モニタが一定になるように励起光パワーをフィードバック制御する制御部も併せて必要になる。なお、この場合、出力は一定であるので $E_r$ 添加 $B_i$ 系EDFの温度制御は入力モニタの変動分に基づいて行ってもよい。

20 また、無中継通信システムのブースターアンプのように、入力レベルは一定に維持され、伝送路の状態次第で出力レベルのみは調整を要する場合、出力モニタの変動分のみに基づいた制御も可能である。

なお、光ファイバネットワークでは、スパンロスだけでなく多重化された信号光のチャネル数が変動する場合も考えられる。この場合、入出力パワーをホトダイオードなどの受光素子でモニタするのみではスパンロス変動と信号チャネル数変動を混同する危険性がある。このため、図12に示された第4実施例に係る光

増幅器400のように、オプティカルパフォーマンスマニタ（OPM）を利用する制御形態や、図13に示された第5実施例に係る光増幅器500のように、ネットワーク全体を監視する上位監視システムからスパンロス量などの情報を得る制御形態が考えられる。

5 図11は、この発明に係る光増幅器における第3実施例の構成を示す図である。

この図に示された光増幅器300は、入力端301から出力端302へ向かって順に、光カプラ311、光アイソレータ321、光カプラ313、Bi系EDF330、光アイソレータ323、光カプラ314、Bi系EDF330、光カプラ315、光アイソレータ322及び光カプラ312を備える。また、この光増幅器300は、光カプラ311に接続された受光素子351（PD）、光カプラ312に接続された受光素子352（PD）、光カプラ313に接続された励起光源353（LD）、光カプラ314に接続された励起光源354、光カプラ315に接続された励起光源355、Bi系EDF330に接して又は近傍に配置された温度検出素子361（サーミスタ）及び温度調整素子362（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器300全体の動作をフィードバック制御する制御部390を備える。制御部390は、温度検出素子361からの検出情報に基づいて温度調節素子362を制御するための温度制御回路391を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくれためのメモリ392を含む。

20 上記制御部390は、±1dB程度の高精度で利得平坦度を維持すべく、例えば以下のような制御を行う。すなわち、当該制御部390は、Bi系EDF330単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内の極小値を $G_{min}$ （dBと）するとき、

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 - 1.2$$

$$\leq \Delta G \leq$$

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 + 1.2$$

なる関係を満たすよう、上記Bi系EDFの温度変動量 $\Delta T$  (K) を調節する。このとき、制御部390のメモリ392もは、より高速な利得平坦制御を可能にすべく、当該光増幅器300の実際の運用時における $\Delta G$  (dB) と $\Delta T$  (K) の実測データが格納される。

5 また、図12は、この発明に係る光増幅器における第4実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器400は、入力端401から出力端402へ向かって順に、光カプラ411、光アイソレータ421、光カプラ413、Bi系EDF430、光アイソレータ423、光カプラ414、Bi系EDF430、光カプラ415、光アイソレータ422及び光カプラ412を備える。また、この光増幅器400は、光カプラ411に接続された受光素子451(PD)、光カプラ412に接続されたオプティカルパフォーマンスマニタ460(OPM)、光カプラ413に接続された励起光源453(LD)、光カプラ414に接続された励起光源454、光カプラ415に接続された励起光源455、Bi系EDF430に接して又は近傍に配置された温度検出素子461(サーミスタ)及び温度調整素子462(ペルチェ素子)、ならびに当該光増幅器400全体の動作を制御する制御部490を備える。制御部490は、温度検出素子461からの検出情報に基づいて温度調節素子462をフィードバック制御するための温度制御回路491を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ492を含む。

20 さらに、図13は、この発明に係る光増幅器における第5実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器500は、入力端501から出力端502へ向かって順に、光カプラ511、光アイソレータ521、光カプラ513、Bi系EDF530、光アイソレータ523、光カプラ514、Bi系EDF530、光カプラ515、光アイソレータ522及び光カプラ512を備える。また、この光増幅器500は、光カプラ511に接続された受光素子551(PD)、光カプラ512に接続された受光素子552(PD)、光カプラ513に接続さ

れた励起光源553（LD）、光カプラ514に接続された励起光源554、光カプラ515に接続された励起光源555、Bi系EDF530に接して又は近傍に配置された温度検出素子561（サーミスタ）及び温度調整素子562（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器500全体の動作をフィードバック制御する制御部590を備える。さらに、この光増幅器500は、外部伝送路を伝搬する光を光カプラ561、562を介してモニタし、スパンロス量などの情報を得るための上位監視システム563を備える。制御部590は、温度検出素子561からの検出情報に基づいて温度調節素子562を制御するための温度制御回路591を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ592を含む。

上述のような制御形態では、どの程度の精度でEr添加Bi系EDFの温度を制御すればよいかが工業的には重要である。通常の陸上光通信システムでは、1つの増幅用中継局に要求される利得偏差は一般的に最大±1dBである。図14のグラフから分かるように、パスバンド1563nm～1615nmにおいて±1dBの利得偏差を満たすためには $G_{min}$ （Bi系EDF単体の25°Cにおける利得極小値）を1.2dBの精度で制御する必要がある。

なお、図14は、室温における信号光波長と規格化された動的利得傾斜（DGT）との関係を示すグラフである。規格化されたDGTは以下の式(9)により与えられる。

$$20 \quad (\Delta G - \Delta G_M) / \Delta G_M \quad \cdots (9)$$

ここで、 $\Delta G$ はDGTであり、 $\Delta G_M$ はパスバンド全域で平均化された利得G<sub>M</sub>の変動分である。

図14から、パスバンド1563nm～1615nmにおいて発生する規格化されたDGTは1.7dB<sub>p-p</sub>である。これを±1dB（つまり2dB<sub>p-p</sub>）の範囲内に収めるためには、 $\Delta G_{min}$ を±(2/1.7)、すなわち±1.2dBの精度で制御しなければならないことが分かる。

5

なお、以上のような演算を行って  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度を制御すると、高速な制御が難しい。このような場合、上述の第3～第5実施例のように、当該光増幅器の出荷時や初期敷設時に、動作利得と  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度の最適地との関係を実際に測定しておき、制御部内のメモリに予め格納しておくのが好ましい。

10

15

さらには、動作利得が不明であっても利得傾斜を検出し、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度をフィードバック制御することも可能である。すなわち、図15に示された第6実施例のように、信号出力スペクトルをオプティカルパフォーマンスマニタ（OPM）でモニタすることによりその利得傾斜を検出し、正の利得傾斜のときには  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF を温める一方、不の利得傾斜のときには  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF を冷却するよう、フィードバック制御すれば出力スペクトルを常に平坦に保つことができる。なお、EDFAの場合、図16に示されたように、最低限、あるチャネルの信号レベルやASEをモニタすれば、同じ効果が得られる。ただし、チャネルの信号レベルをモニタする場合にはADMの導入によりモニタ中のチャネルが消える可能性があることに注意する必要がある。図16中のエリアAは、信号レベルのモニタ範囲を示し、エリアBはASEのモニタ範囲を示す。

20

25

図15は、この発明に係る光増幅器における第6実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器600は、入力端601から出力端602へ向かって順に、光カプラ611、光アイソレータ621、光カプラ613、 $B_i$  系 EDF630、光アイソレータ623、光カプラ614、 $B_i$  系 EDF630、光カプラ615、光アイソレータ622及び光カプラ612を備える。また、この光増幅器600は、光カプラ611に接続された受光素子651（PD）、光カプラ612に接続されたオプティカルパフォーマンスマニタ660（OPM）、光カプラ613に接続された励起光源653（LD）、光カプラ614に接続された励起光源654、光カプラ615に接続された励起光源655、 $B_i$  系 EDF

430に接して又は近傍に配置された温度調整素子662（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器600全体の動作を制御する制御部690を備える。制御部690は、温度調節素子662をフィードフォワード制御するための温度制御回路691を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、  
5 予め実測データを格納しておくためのメモリ692を含む。

なお、光通信システムでは、中継局内の温度変化などによりE<sub>r</sub>添加B<sub>i</sub>系EDFの温度が変動してしまう可能性があり、図5(a)に示されたような現象は利得傾斜の発生原因となり得る。このような場合、例えば図11に示された第3実施例のように、サーミスタとペルチェ素子の組み合わせによりE<sub>r</sub>添加B<sub>i</sub>系EDFの温度を安定化させる方法が考えられる。ただし、他の方法としては、図17の第7実施例に係る光増幅器のように、透過スペクトルが可変な光学デバイスを利用する制御形態が考えられる。このように透過スペクトルが可変な光学デバイスとしては、例えば可変減衰器などがある。

なお、図17は、この発明に係る光増幅器における第7実施例の構成を示す図である。この図に示された光増幅器700は、入力端701から出力端702へ向かって順に、光カプラ711、光アイソレータ721、光カプラ713、B<sub>i</sub>系EDF730、光アイソレータ723、可変減衰器760、光アイソレータ724、光カプラ714、B<sub>i</sub>系EDF730、光カプラ715、光アイソレータ722及び光カプラ712を備える。また、この光増幅器700は、光カプラ711に接続された受光素子751(PD)、光カプラ712に接続されたオプ受光素子752(PD)、光カプラ713に接続された励起光源753(LD)、光カプラ714に接続された励起光源754、光カプラ715に接続された励起光源755、B<sub>i</sub>系EDF730に接して又は近傍に配置された温度検出素子461(サーミスタ)、ならびに当該光増幅器700全体の動作を制御する制御部790を備える。制御部790は、温度検出素子761からの検出情報に基づいて可変減衰器760をフィードバック制御するための可変ATT制御回路791

を備えるとともに、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ 792 を含む。

この第 7 実施例に係る光増幅器 700において、制御部 790 は、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF 730 の温度が高まれば可変減衰器 760 の光減衰量を高める一方、  
5 該  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF 730 の温度が下がれば可変減衰器 760 の光減衰量を下げるよう制御する。また、メモリ 792 に実測データを格納しておけばより高速な制御が可能になる。

上述の制御では、光増幅器の利得変動と  $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度変動をそれぞれ個別に扱ったが、実際の光通信システムでは両者が同時に変動する場合が  
10 考えられる。この場合、両方の変動を可変減衰器のみで補償しようとすると損失が大きくなりすぎ励起効率や雑音指数が劣化する可能性もある。その一方で、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF の温度のみで補償しようとしてもペルチェ素子やヒーターで変更可能な温度範囲は有限である。現実的には、図 18 に示された第 8 実施例に係る光増幅器 800 のように、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF 830 の温度制御と可変減衰器 860 の光減衰量制御の併用が多くなると考えられる。この第 8 実施例に係る光増幅器 800 は、動作利得の変動量  $\Delta G$ 、 $E_r$  添加  $B_i$  系 EDF 830 の温度変動量  $\Delta T$ 、及び可変減衰器 860 のロス変動量  $\Delta A$  の関係を最適に保つよう演算しながら  $\Delta A$ 、あるいは  $\Delta A$  と  $\Delta T$  を算出する制御形態が考えられる。  
15

図 18 は、この発明に係る光増幅器における第 8 実施例の構成を示す図である  
20。この図に示された光増幅器 800 は、入力端 801 から出力端 802 へ向かって順に、光カプラ 811、光アイソレータ 821、光カプラ 813、 $B_i$  系 EDF 830、光アイソレータ 823、可変減衰器 860、光アイソレータ 824、光カプラ 814、 $B_i$  系 EDF 830、光カプラ 815、光アイソレータ 822 及び光カプラ 812 を備える。また、この光増幅器 800 は、光カプラ 811 に接続された受光素子 851 (PD)、光カプラ 812 に接続された受光素子 852 (PD)、光カプラ 813 に接続された励起光源 853 (LD)、光カプラ 8

14に接続された励起光源854、光カプラ815に接続された励起光源855、B<sub>i</sub>系EDF830に接して又は近傍に配置された温度検出素子861（サーミスター）及び温度調整素子862（ペルチェ素子）、ならびに当該光増幅器800全体の動作を制御する制御部890を備える。制御部890は、温度検出素子861からの検出情報に基づいて温度調節素子862をフィードバック制御するとともに可変減衰器860も同時にフィードバック制御するための可変ATT/温度制御回路891と、より高速なフィードバック制御を可能にするため、予め実測データを格納しておくためのメモリ892を備える。

なお、利得平坦度を±1dBの高精度で維持するためには、上記制御部は、光增幅モジュールにおけるB<sub>i</sub>系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値をG<sub>min</sub>(dB)とするとき、可変減衰器における光減衰量ΔA(dB)が

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T + 1.2$$

なる関係を満たすよう、上記温度変化ΔT(K)に基づいて、可変減衰器を制御する。

さらに、上記制御部は、光増幅モジュールにおけるB<sub>i</sub>系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値をG<sub>min</sub>(dB)とするとき、可変減衰器における光減衰量ΔA(dB)が

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2$$

$$\leq \Delta A \leq$$

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

なる関係を満たすよう、該光増幅モジュールにおける動作利得の変化量ΔG(dB)及び温度変化ΔT(K)に基づいて、可変減衰器を制御してもよい。また、この第8実施例においても、メモリ892に実測データを格納しておけばより

高速な制御が可能になる。

先に述べたように、拡張Lバンド用Bi系EDFの雑音指数は必ずしも量子限界まで達していない。このため、ラマン増幅器と当該各実施例に係る光増幅器とを組み合わせることにより、より雑音指数を改善するのが好ましい。この事実を検証するため、図19A及び図19Bにそれぞれ示された構成の光通信システムが用意された。図19Aに示された光通信システムは、長さ80kmの伝送路ファイバ900(SMF: Single-Mode Fiber)とこの発明に係るEr添加Bi系EDFを含む光増幅器(Bi-EDFA)910と、利得等化器920により構成されている。図19Bに示された光通信システム(この発明に係る光通信システムの第2実施例)は、上記と組み合せた光通信システムと、図19Bに示された光通信システムは、図19Aの光通信システムと同様に、長さ80kmのSMF900と、Bi-EDFA920と、利得等化器920を備えるとともに、光カプラ930を介して複数チャネルの励起光をSMF900へ供給する励起光供給システム940をさらに備えることにより、該Bi-EDFAの上流側に分布ラマン増幅器を構成している。なお、図19Bの光通信システムにおいて、励起光供給システム940は、励起チャネルとして、波長1468nm、出力166mWの光を出力する光源942aと、励起チャネルとして、波長1472nm、出力269mWの光を出力する光源942bと、励起チャネルとして、波長1520nm、出力75mWの光を出力する光源942cと、励起チャネルとして、波長1524nm、出力210mWの光を出力する光源942dと、これら光源942a～942dそれぞれから出力された励起チャネルを合波する合波器941を備える。

また、図20Aは、信号光波長と利得の関係を示すグラフであり、図20Bは、信号光波長と雑音指数(NF: Noise Figure)の関係を示すグラフである。

なお、図20Aにおいて、グラフG1810aは図19Aに示された光通信システムにおけるBi-EDFAの利得スペクトル、グラフG1821aは図19

Bに示された光通信システムにおける分布型ラマン増幅器のON-OFF利得、グラフ1822aは図19Bに示された光通信システムにおけるBi-EDFA単体の利得スペクトル、グラフG1823aは図19Bに示された光通信システム全体のトータル利得をそれぞれ示している。さらに、図20Bにおいて、グラフG1810bは図19Aに示された光通信システムにおけるBi-EDFAの利得スペクトル、グラフ1821bは図19Bに示された光通信システムにおける分布型ラマン増幅器のON-OFF利得、グラフG1822bは図19Bに示された光通信システムにおけるBi-EDFA単体の利得スペクトル、グラフG1823bは図19Bに示された光通信システム全体のトータル利得をそれぞれ示している。

図19Aの光通信システムでは1563nm～1615nmの信号波長帯域における拡張LバンドEDFA単体の雑音指数は8dBに達しているのに対し、図19Bの光通信システム（分布型ラマン増幅器含む）では、実効的な雑音指数は4dB以下となる。また、利得偏差は、図19Aの光通信システムが3dBに達するのに対し、図19Bの光通信システムは2dBに改善される。このように、当該光増幅器のみならず、該光増幅器の上流側に位置する光ファイバ伝送路をラマン増幅用光ファイバとして利用することにより雑音指数の改善が可能になる。

以上のようにこの発明によれば、光増幅媒体としてBi系光導波路を利用するこことにより、熱損傷や毒性の問題が無く実用的であり、また、Lバンドに含まれるより広帯域の実効的信号波長域において相対利得偏差の小さい利得スペクトルが実現できる。

クレーム：

1. 波長 1 6 1 0 nm 以上の波長域を含む信号光波長帯域内の複数チャネル  
が多重化された信号光を一括増幅する光増幅モジュールであって、

前記信号光が伝搬する領域であって E<sub>r</sub> 元素が添加された光導波領域を有し、

5 酸化 B<sub>i</sub> 系ホストガラスからなる B<sub>i</sub> 系光導波路と、

前記 B<sub>i</sub> 系光導波路の光導波領域内に反転分布を生じさせるよう、該光導波領  
域に励起光を供給する励起光供給システムとを備えた光増幅モジュール。

2. クレーム 1 の光増幅モジュールにおいて、

E<sub>r</sub> 元素が添加された前記光導波領域には、B 元素がさらに添加されている。

10 3. クレーム 1 の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの動作温度範囲のうち所定動作温度において前記 B<sub>i</sub> 系  
光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が 25% 未満になるよう、  
前記励起光供給システムから前記 B<sub>i</sub> 系光導波路に供給される励起光の光パワー  
を調整する制御部を備える。

15 4. クレーム 3 の光増幅モジュールにおいて、

前記相対利得偏差は、19% 未満である。

5. クレーム 1 の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記 B<sub>i</sub> 系光導波路の正味  
利得スペクトルにおける相対利得偏差が 25% 未満になるよう、前記励起光供給  
20 システムから前記 B<sub>i</sub> 系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御  
部を備える。

6. クレーム 5 の光増幅モジュールにおいて、

前記相対利得偏差は、19% 未満である。

7. クレーム 1 の光増幅モジュールは、さらに、

25 当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記 B<sub>i</sub> 系光導波路の正味  
利得スペクトルにおける相対利得偏差が 25% 未満となる波長帯域幅が 37 nm

を越えるよう、前記励起光供給システムから前記B*i*系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

8. クレーム7の光増幅モジュールにおいて、

前記波長帯域幅は、50nmを越える。

5 9. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

当該光増幅モジュールの全動作温度範囲内において前記B*i*系光導波路の正味利得スペクトルにおける相対利得偏差が19%未満となる波長帯域幅が37nmを越えるよう、前記励起光供給システムから前記B*i*系光導波路に供給される励起光の光パワーを調整する制御部を備える。

10 10. クレーム9の光増幅モジュールにおいて、

前記波長帯域幅は、50nmを越える。

11. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

前記B*i*系光導波路又はその近傍の温度を検出する温度検出素子を備える。

12. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

15 前記B*i*系光導波路又はその近傍の温度を調整する温度調整素子を備える。

13. 請求項12記載の光増幅モジュールと、

前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)に基づいて、該光増幅モジュールのB*i*系光導波路又はその近傍の温度を $\Delta T$  (K)だけ変化させる制御部とを備えた光増幅器。

20 14. クレーム13の光増幅器において、

前記制御部は、前記B*i*系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値を $G_{min}$  (dBと) するとき、

$$(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 - 1.2$$

$$\leq \Delta G \leq$$

25  $(\Delta T \cdot G_{min}) \times 0.0036 + 1.2$

なる関係を満たすよう、上記 $\Delta T$  (K)を制御する。

15. クレーム13の光増幅器において、

前記制御部は、当該光増幅器の実際の運用時における $\Delta G$  (dB) と $\Delta T$  (K) の実測データを、予め格納したメモリを備える。

16. 請求項12記載の光増幅モジュールと、

5 検出された利得傾斜に基づいて、前記B*i*系光導波路又はその近傍の温度を変化させる制御部を備えた光増幅器。

17. 請求項12記載の光増幅モジュールと、

前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器と、

10 検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに前記光増幅モジュールのB*i*系光導波路に対する加熱指示を行う一方、検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに前記光増幅モジュールのB*i*系光導波路に対する冷却指示を行う制御部とを備えた光増幅器。

18. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

15 前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である光損失部品を備える。

19. クレーム18の光増幅モジュールにおいて、

前記光損失部品は可変光減衰器を含む。

20. 請求項19記載の光増幅モジュールと、

20 検出された前記光増幅モジュールのB*i*系光導波路又はその近傍の温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、前記光増幅モジュールの可変光減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) を決定する制御部とを備えた光増幅器。

21. クレーム13の光増幅器は、さらに、

25 前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器をさらに備え、

前記制御部は、前記可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が検出された前

記温度変化 $\Delta T$  (K) に比例するよう、該可変減衰器を制御する。

22. クレーム 13 の光増幅器は、さらに、

前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器をさらに備え、

5 前記制御部は、前記光増幅モジュールにおけるB<sub>i</sub>系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値をG<sub>min</sub> (dB) とするとき、前記可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - 1.2 \\ \leq \Delta A \leq$$

10  $-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T + 1.2$

なる関係を満たすよう、前記温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、前記可変減衰器を制御する。

23. クレーム 20 の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおけるB<sub>i</sub>系光導波路単体の25°Cにおける動作利得の信号波長帯域内での極小値をG<sub>min</sub> (dB) とするとき、前記可変減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) が

$$-0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G - 1.2 \\ \leq \Delta A \leq \\ -0.0036 \cdot G_{\min} \cdot \Delta T - \Delta G + 1.2$$

20 なる関係を満たすよう、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) に基づいて、前記可変減衰器を制御する。

24. クレーム 20 の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB) 及び温度変化 $\Delta T$  (K) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを25 予め格納したメモリを備える。

25. クレーム 20 の光増幅器において、

前記制御部は、前記光増幅モジュールにおける動作利得の変化量 $\Delta G$  (dB)、温度変化 $\Delta T$  (K) 及び前記可変光減衰器における光減衰量 $\Delta A$  (dB) の、当該光増幅器の実際の運用時における実測データを、予め格納したメモリを備える。

5 26. クレーム19の光増幅モジュールと、

---

検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜に基づき、前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) を変化させる制御部を備えた光増幅器。

27. 前記信号光の伝送経路上に設けられ、前記信号光に対する損失特性が可変である可変減衰器を有する、請求項12記載の光増幅モジュールと、

10 検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が正のときに前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の増加指示を行う一方、検出された前記光増幅モジュールにおける利得傾斜が負のときに前記可変減衰器の光減衰量 $\Delta A$  (dB) の減少指示を行う制御部とを備えた光増幅器。

28. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

15 前記B<sub>i</sub>系光導波路の背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) とE<sub>r</sub>による吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m)との間に以下の関係が成り立つ。

$$\alpha_B \leq 0.021 \alpha$$

29. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

前記B<sub>i</sub>系光導波路の背景損失  $\alpha_B$  (dB/m) とE<sub>r</sub>による吸収ピーク  $\alpha$  (dB/m)との間に以下の関係が成り立つ。

$$\alpha_B \leq 0.015 \alpha$$

30. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

前記B<sub>i</sub>系光導波路は、光ファイバを含む。

31. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

25 前記励起光供給システムは、中心出力波長が最高出力時に1453nm～1473nmの範囲にある光源を含む。

32. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

前記励起光供給システムは、中心出力波長が常時1453nm～1473nmの範囲にある光源を含む。

33. クレーム1の光増幅モジュールにおいて、

5 前記励起光供給システムは、

光反射面と該光反射面と対向する光出射面とを有する半導体発光素子と、

前記半導体発光素子の光出射面から出射された光のうち特定波長の光の一部を反射し、該反射された光を前記光出射面から前記半導体発光素子の内部へ入射させる回折格子とを含む。

10 34. クレーム33の光増幅モジュールにおいて、

前記回折格子は、光ファイバ上に形成された光ファイバグレーティングを含む。

35. クレーム1の光増幅モジュールは、さらに、

前記信号光が伝搬する領域であってEr元素が添加された光導波領域を有し、石英系ホストガラスからなる石英系光導波路を備える。

15 36. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、前記石英系光導波路は、前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記Bi系光導波路の上流側に配置された

37. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、

前記石英系光導波路は、前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記Bi系光導波路の下流側に配置されている。

38. クレーム35の光増幅モジュールにおいて、

前記石英系光導波路の光導波領域には、Al元素及びLa元素の少なくとも一方とP元素とが共添加されている。

25 39. クレーム1の光増幅モジュールを含み、Lバンドに含まれる複数チャネルが多重化された信号光を前記光増幅モジュールにより増幅する光増幅器。

40. クレーム39の光増幅器は、さらに、

前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記B i 系光導波路の上流側に配置されたラマン増幅用光ファイバを備える。

4 1. クレーム 4 0 の光増幅器において、

5 前記ラマン増幅用光ファイバには、波長 1 4 7 0 nm 付近の励起光及び波長 1 5 2 0 nm 以上の励起光の少なくとも一方が供給される。

4 2. クレーム 3 9 記載の光増幅器を含み、L バンドに含まれる複数チャネルが多重化された信号光を伝送するとともに、該信号光を前記光増幅器により増幅する光通信システム。

4 3. クレーム 4 2 の光通信システムは、さらに、

10 前記信号光の伝送経路上であって該信号光の進行方向から見て前記光増幅器の上流側に配置されたラマン増幅用光ファイバを備える。

4 4. クレーム 4 3 の光通信システム部において、

15 前記ラマン増幅用光ファイバには、波長 1 4 7 0 nm 付近の励起光及び波長 1 5 2 0 nm 以上の励起光の少なくとも一方が供給されることを特徴とする請求項 5 2 記載の光通信システム。

開示内容の要約

この発明は、Lバンドにおいて相対利得偏差の小さい広帯域利得スペクトルを実現する実用的な光増幅モジュール等に関する。励起光源からの励起光は、光カプラを経て、Bi系EDFへ供給される。入力端を介して入力されたLバンドの多重化信号光は、光カプラ、光アイソレータ及び光カプラを経てBi系EDFに到達し、該Bi系EDFにおいて一括増幅される。Bi系EDFにおいて増幅された多重化信号光は、光カプラ、光アイソレータ及び光カプラを経て出力端から出力される。